

УДК 691.327.33

МОДЕЛЮВАННЯ МАСИВУ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ ТА ЙОГО РОБОТИ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

MODELING OF ARRAY OF CELLULAR CONCRETE AND ITS WORK UNDER LOAD

Фамуляк Ю.Є., к.т.н., доцент, (Львівський національний аграрний університет, м. Дубляни), <https://orcid.org/0000-0003-3044-5513>;

Famulyak Yu., candidate of technical sciences, associate professor, (Lviv National Agrarian University, Dubliany), <https://orcid.org/0000-0003-3044-5513>;

Ніздрюваті бетони, як відомо, під навантаженням руйнуються практично миттєво при досягненні певних критичних напружень. В статті подається один з можливих варіантів моделювання структури масиву ніздрюватих бетонів та пропонується певні припущення щодо процесу тріщиноутворення в такому комірковому, не суцільному середовищі.

Cellular concrete is known to fail under load almost instantly when certain critical stresses are reached. The article presents one of the possible options for modeling the structure of the array of cellular concrete and offers certain assumptions on the process of cracking in such a cellular, non-continuous environment.

In current construction, a significant part of non load-bearing and load-bearing structures is built of cellular concrete. They are widely used in the installation of thermal and sound insulation of premises or fire protection. Considering the low strength characteristics of such concrete, it is important to describe the process of destruction of structural elements made of cellular concrete accurately. It is reported that due to their fragility cellular concrete fails under load almost instantly when certain critical stresses are reached in the concrete. This type of destruction is called “brittle fracture”. The modern theory of concrete failure, as well as the so-called “brittle fracture” is based on the well-known Griffith theory. A lot of researchers dealt with this problem, but mostly their studies concerned heavy solid concrete. The task of our study is the process of modeling an array of cellular concrete and its work under load, taking into account the characteristics of this type of concrete. Alternatively, one applied a combination of hollow spheres (air bubbles) of different diameters to model the structure of cellular concrete array, which is a realistic representation of cellular concrete array. Concerning the analysis of the cut surface of cellular concretes, air bubbles in the structure of concrete

are formed in the size from 0.5 to 4 mm. In general, they can be divided into three groups: “small”, “medium” and “large”. The ratio of the diameters of air bubbles in this division in most cases is 1:2:4. In the area, such air bubbles can join in the number of 3 or 4. The elementary volume of cellular concrete array is presented in the form of a cylinder, as an option of a parallelepiped. One used the Ansys computer program to determine the stresses that occur in elementary volumes of cellular concrete. This program allowed obtaining a picture of stresses in the elements due to compression or stress of the latter. As a result of the conducted modeling, a quantitative picture of stresses in the elementary volume (cylinder or parallelepiped) of cellular concrete was obtained.

Ключові слова: ніздрюватий бетон, крихке руйнування, тріщиноутворення, куля, комірка-бульбашка, об’ємна модель.
cellular concrete, brittle fracture, cracking, air bubble, ball, three-dimensional model.

Вступ. Значну частину огорожуючих та несучих конструкцій у сучасному будівництві споруджують з ніздрюватих бетонів. Їх широко використовують при влаштуванні тепло- та звукоізоляції приміщень, а також при вогнезахисті окремих конструкцій чи будівель в цілому [1-3]. Враховуючи низькі міцнісні характеристики таких бетонів, важливе значення має достовірний опис процесу руйнування конструктивних елементів, виконаних з ніздрюватих бетонів, а це дозволить проводити більш точніші розрахунки конструкцій при проектуванні будівель та споруд за умови використання ніздрюватих бетонів.

Аналіз останніх досліджень. Загально відомо, що ніздрюваті бетони, у зв’язку з їхньою крихкістю, під навантаженням руйнуються практично миттєво при досягненні певних критичних напружень в масиві бетону. Такий тип руйнування носить назву «крихке руйнування». Сучасна теорія руйнування бетону, а також і так званого «крихкого руйнування» базується на відомій теорії Гріфітса [4, 5]. Існує ряд дослідників, які займались цією проблемою, але в основному ці дослідження стосувались важких бетонів [6-8].

Основним визначальним фактором, який впливає на міцність, несучу здатність та стійкість конструкцій та конструктивних елементів виконаних з крихких матеріалів, у нашому випадку ніздрюватих бетонів, – це тріщини [9, 10]. Їх поява, ріст за висотою чи довжиною конструктивного елемента, ширина їх розкриття, вказує на певні «недоліки» та критичні напруження чи навантаження, які виникають в процесі експлуатації конструкції. Тому поява та розвиток тріщин відіграють важливу роль в конструктивних елементах.

З літературних джерел відомо, що появу та ріст тріщини у бетонах можна класифікувати за наступними факторами:

✓ технологічно-виробничі: тріщини, які виникають в процесі виготовлення конструкцій, а саме усадочні, пов'язані з умовами витримання бетонів при виготовленні конструкцій, в момент передачі зусиль попереднього напруження арматури на бетон тощо;

✓ експлуатаційні: тріщини від експлуатаційних та надмірних навантажень, які сприймають конструкції в процесі експлуатації, тріщини від зовнішніх впливів (процес замерзання-розморожування).

Постановка мети і задач досліджень. Завданням нашого дослідження є процес моделювання масиву ніздрюватого бетону та його роботи під навантаженням з врахуванням особливостей такого виду бетону.

Методика досліджень. З метою вивчення і статистичного аналізу структурної будови масиву ніздрюватих бетонів, було виготовлено ряд дослідних зразків у вигляді кубиків $10 \times 10 \times 10$ см з піно- та газобетону неавтоклавного твердіння. Після завершення процесу твердіння ніздрюватого бетону, поверхню кубиків очищали від поверхневої цементної плівки та продували струменем стиснутого повітря. Дану операцію виконували для того, щоб проявити структуру ніздрюватого бетону. Завершивши очистку поверхні кубика, її фотографували. Шаблон, що використовувався при фотографуванні являв собою пластину з квадратним прорізом. По контуру прорізу було виконана шкала з ціною поділки 5 мм. Розмір квадратного прорізу – 50×50 мм. Квадратний проріз виконували, для того щоб можна було оцінити розміри комірок-бульбашок ніздрюватих бетонів. Результати фотографування наведені на рис. 1.

Як можна бачити на рис. 1, комірки-бульбашки повітря в масиві ніздрюватого бетону утворюються розміром від 0,5 до 4 мм. Загалом їх можна умовно поділити на три групи: «малі», «середні» та «великі». Співвідношення діаметрів комірок-бульбашок при такому поділі в більшості випадків становить 1:2:4. В площині такі комірки-бульбашки можуть стикуватись по три або чотири. Разом з тим, з рисунка видно, що із зростанням міцності ніздрюватого бетону (перехід від теплоізоляційного бетону до конструктивного) розміри комірок-бульбашок стають дрібнішими, тобто, пористість матеріалу стає меншою, а вага більшою.

За такого розподілу масиву ніздрюватого бетону, що є характерним для більшості піно- та газобетонів, можна змоделювати наступні можливі варіанти поєднання комірок-бульбашок бетону в одиничному об'ємі. Перш за все, виділимо з масиву бетону елементарний об'єм, який об'єднує можливе розміщення в просторі таких комірок-бульбашок і представимо такі варіанти схематично за умови максимально щільного примикання комірок-бульбашок між собою з дотриманням зазорів між ними. Детально зупинимось на можливих варіантах їх розміщення.

В масиві ніздрюватого бетону вибираємо елементарну площину одиничного розміру, яка б перетинала щонайменше три комірки-бульбашки за 3-кульової схеми, або чотири комірки-бульбашки за 4-кульової схеми, що

є характерним для ніздрюватих бетонів. Таке припущення робимо виходячи із статистичного аналізу структурної будови поверхні масиву таких бетонів. Подальший аналіз отриманих зображень та ймовірність об'єднання таких комірок-бульбашок дозволяє згрупувати можливі варіанти у кілька груп за три- та чотири-кульової схеми розміщення комірок-бульбашок за умови об'єднання в схему комірок-бульбашок які перетинаються з елементарним об'ємом. Як було сказано раніше, для моделювання приймаємо «малі», «середні» та «великі» комірки.

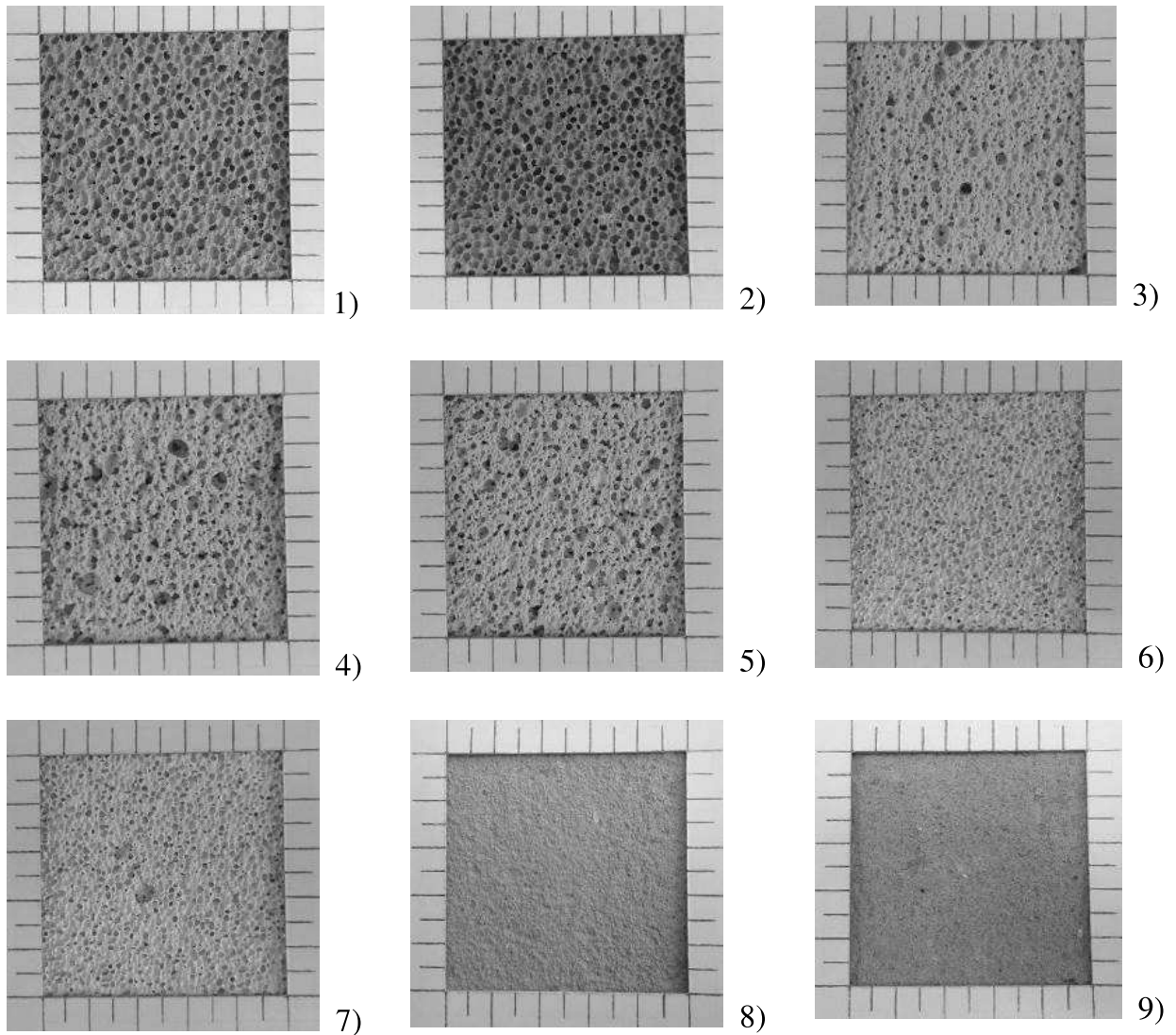


Рис. 1. Вигляд ніздрюватих бетонів різних типів:
 1)... 5) – пінобетон теплоізоляційний; 6), 7) – газобетон теплоізоляційно-конструктивний; 8), 9) – пінобетон конструктивний

За три-кульової схеми розміщення комірок-бульбашок (див. таблицю 1):

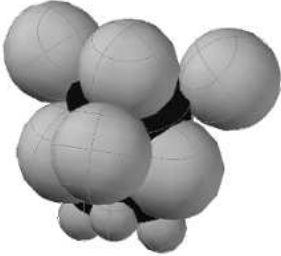








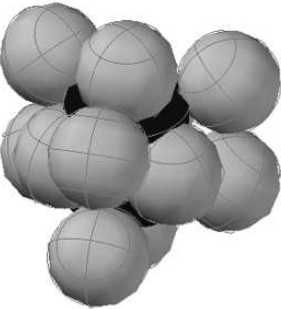
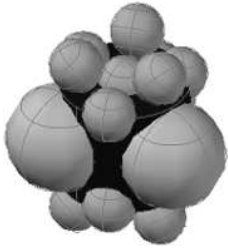
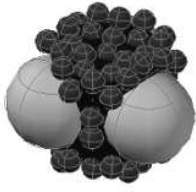



✓ перша група – в площині лежать комірки-бульбашки однакового розміру до яких примикають зверху і знизу комірки-бульбашки іншого або такого ж розміру, причому величина їх є різною;













✓ друга група – в площині лежать комірочки-бульбашки однакового розміру до яких примикають зверху і знизу комірочки-бульбашки іншого або такого ж розміру, причому величина їх є однаковою;

✓ третя група – об'єднує в площині та верхні і нижні комірочки-бульбашки різних розмірів.

Таблиця 1

Схеми об'єднань куль за три-кульової схеми

Перша група		
 (3B)*+B**+C***	 (3B)*+B**+M***	 (3B)*+C**+M***
 (3C)*+B**+C***	 (3C)*+B**+M***	 (3C)*+C**+M***
 (3M)*+B**+C***	 (3M)*+B**+M***	 (3M)*+C**+M***
Друга група		
 (3B)*+B**+B***	 (3B)*+C**+C***	 (3B)*+M**+M***
 (3C)*+B**+B***	 (3C)*+C**+C***	 (3C)*+M**+M***

 $(3M)^*+V^{**}+V^{***}$	 $(3M)^*+C^{**}+C^{***}$	 $(3M)^*+M^{**}+M^{***}$
Третя група		
 $(2V+1C)^*+C^{**}+C^{***}$	 $(2V+1C)^*+M^{**}+C^{***}$	 $(2V+1M)^*+M^{**}+M^{***}$
 $(1V+2C)^*+C^{**}+C^{***}$	 $(1V+2C)^*+M^{**}+C^{***}$	 $(2C+1M)^*+M^{**}+M^{***}$
 $(1V+2M)^*+M^{**}+M^{***}$	 $(1C+2M)^*+M^{**}+M^{***}$	 $(1V+1C+1M)^*+M^{**}+M^{***}$

В таблиці прийняті наступні позначення: В – велика куля; С – середня куля; М – мала куля; * – розмір та кількість куль площини; ** – розмір кулі над площиною; *** – розмір куль під площиною.

Подібний поділ на групи, який відрізняється від три-кульової схеми, можна зробити і за чотири-кульової схеми розміщення комірок-бульбашок (див. таблицю 2, 3):

✓ перша група – в площині лежать чотири комірки-бульбашки однакового розміру до яких примикають зверху і знизу комірки-бульбашки іншого або такого ж розміру, причому величина їх є різною;

✓ друга група – в площині лежать чотири комірки-бульбашки однакового розміру до яких примикають зверху і знизу комірки-бульбашки іншого або такого ж розміру, причому величина їх є однаковою;

✓ третя група – в площині лежать три комірки-бульбашки однакового розміру та одна іншого розміру до яких примикають зверху і знизу комірки-бульбашки іншого або такого ж розміру, причому величина їх є різною;

✓ четверта група – в площині лежать три комірки-бульбашки однакового розміру та одна іншого розміру до яких примикають зверху і знизу комірки-бульбашки іншого або такого ж розміру, причому величина їх є однаковою;

✓ п'ята група – в площині лежать дві комірки-бульбашки однакового розміру та дві іншого розміру до яких примикають зверху і знизу комірки-бульбашки іншого або такого ж розміру, причому величина їх є різною;

✓ шоста група – в площині лежать дві комірки-бульбашки однакового розміру та дві іншого розміру до яких примикають зверху і знизу комірки-бульбашки іншого або такого ж розміру, причому величина їх є однаковою;

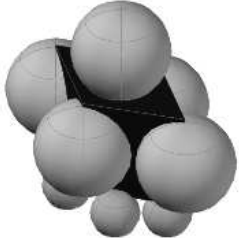








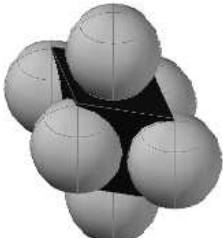


✓ сьома група – в площині лежать дві комірки-бульбашки однакового розміру та дві різного розміру інші ніж дві однакові до яких примикають зверху і знизу комірки-бульбашки різних розмірів.







Для комірок-бульбашок з третьої по сьому групи їх розміщення можливе у двох варіантах.

За даної схеми доцільним є вибрати елементарний об'єм у вигляді паралелепіпеда.

Таблиця 2

Схеми об'єднань куль за чотири-кульової схеми

Перша група		
 (4B)*+V**+C***	 (4B)*+V**+M***	 (4B)*+C**+M***
 (4C)*+V**+C***	 (4C)*+V**+C***	 (4C)*+C**+M***
 (4C)*+V**+C***	 (4C)*+V**+C***	 (4C)*+C**+M***
Друга група		
 (4B)*+V**+V***	 (4B)*+C**+C***	 (4B)*+M**+M***


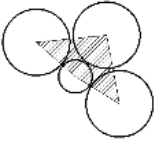

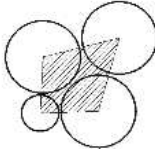



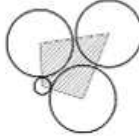

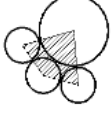

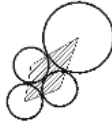




 (4C)*+V**+V***	 (4C)*+V**+V***	 (4C)*+V**+V***
 (4M)*+V**+V***	 (4M)*+V**+V***	 (4M)*+V**+V***

В таблиці прийняті ті ж позначення, що і в табл. 1.

Для інших груп можливі схеми об'єднань зведені в табл. 3 у спрощеному вигляді (не вказані кулі над та під площиною).

Таблиця 3

Спрощені схеми об'єднань куль за чотири-кульової схеми

Третя та четверта групи			
Варіант 1 об'єднання		Варіант 2 об'єднання	
(3V+1C)*+...**+...***			
			
(3V+1M)*+...**+...***			
			
(3C+1V)*+...**+...***			
			
(3C+1M)*+...**+...***			
			

$(3M+1B)^*+...^{**}+...^{***}$			
$(3M+1C)^*+...^{**}+...^{***}$			
П'ята та шоста групи			
$(2B+2C)^*+...^{**}+...^{***}$			
$(2B+2M)^*+...^{**}+...^{***}$			
$(2C+2M)^*+...^{**}+...^{***}$			
Сьома група			
$(2B+1C+1M)^*+...^{**}+...^{***}$			
$(2C+1B+1M)^*+...^{**}+...^{***}$			
$(2M+1B+1C)^*+...^{**}+...^{***}$			

В таблиці прийняті ті ж позначення, що і в табл. 1.

Схематичне зображення всіх груп зведено в таблицях 1, 2 та 3. Необхідно зазначити, що комірки-бульбашки зображені у вигляді куль різного діаметру, а елементарний об'єм масиву ніздрюватого бетону – циліндром (паралелепіедом). Співвідношення між діаметрами куль прийнято 1:2:4. Габаритні розміри елементарного об'єму (циліндра чи паралелепіеда) приймаємо наступними. У випадку циліндра, його діаметр дорівнює діаметру кола, яке об'єднує центри куль, що лежать в одній площині у випадку однакових куль. Якщо ж в площині лежать кулі різних розмірів, діаметр кола, а отже, і діаметр циліндра, визначає найменша куля. Висоту циліндра призначаємо рівною його діаметру. Крім того, між кулями передбачаємо певний зазор (у нашому випадку він прийнятий $0,1 \cdot R$, де R – радіус найменшої кулі в об'єднанні). У випадку елементарного об'єму масиву ніздрюватого бетону у вигляді паралелепіеда, використовуємо чотирикутний паралелепіед, ребра якого проходять через центри куль, що лежать в одній площині. Висоту паралелепіеда приймаємо рівною діаметру найменшої кулі, які стикаються, додавши величину $0,1 \cdot R$, де R – радіус найменшої кулі в об'єднанні. Як і у випадку елементарного об'єму у вигляді циліндра, між кулями передбачено зазори таких самих розмірів.

Для подальшого моделювання масиву ніздрюватих бетонів була проведена наступна операція: від об'єму циліндра чи паралелепіеда (елементарного об'єму) відняли об'єм куль (комірок-бульбашок). В результаті було отримано елементарні об'єми, якими з достовірною точністю можна змоделювати елементарну частинку чи елементарний об'єм масиву ніздрюватих бетонів. Цей процес перетворення, наприклад, для куль першої групи за три-кульової схеми, подано на рис. 2, а для куль першої групи за чотири-кульової схеми, подано на рис. 3

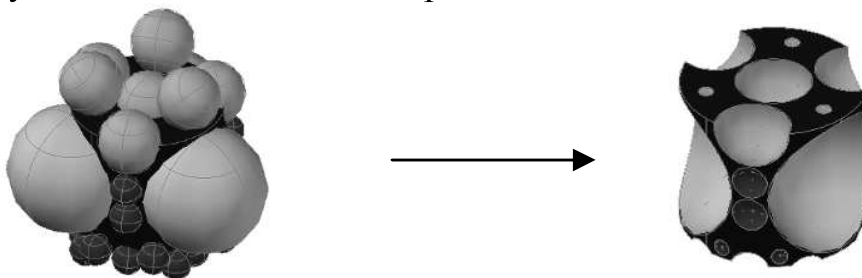


Рис. 2. Процес моделювання елементарного об'єму за три-кульової схеми поєднання куль (зразок $(3V)^*+C^{**}+M^{***}$)

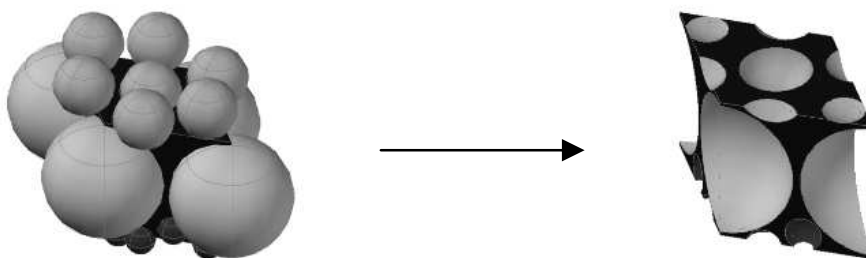


Рис. 3. Процес моделювання елементарного об'єму за чотири-кульової схеми поєднання куль (зразок $(4V)^*+C^{**}+M^{***}$)

Для визначення напружень, які виникають в елементарних об'ємах масиву ніздрюватих бетонів була використана комп'ютерна програма ANSYS. Дана програма дозволила отримати картину напружень в елементах за умови стиску чи розтягу останніх. В процесі моделювання нижня поверхня елементарного об'єму (циліндра чи паралелепіпеда) була жорстко закріплена, а навантаження, у вигляді рівномірно розподіленого, прикладалось до верхньої поверхні об'єму. За умови, якщо зверху та знизу середньої площини куль були кулі різних розмірів, моделювання роботи під навантаженням проводилось два рази: закріплювались по чергово нижня, а потім верхня поверхня циліндра (для наглядності циліндр розвертався на 180°).

В результаті проведеного моделювання була отримана кількісна картина напружень в елементарному об'ємі масиву ніздрюватого бетону (рис. 4). В процесі моделювання навантаження, яке прикладали до поверхні елементарного об'єму було сталим і дорівнювало 1000 Н/м^2 .

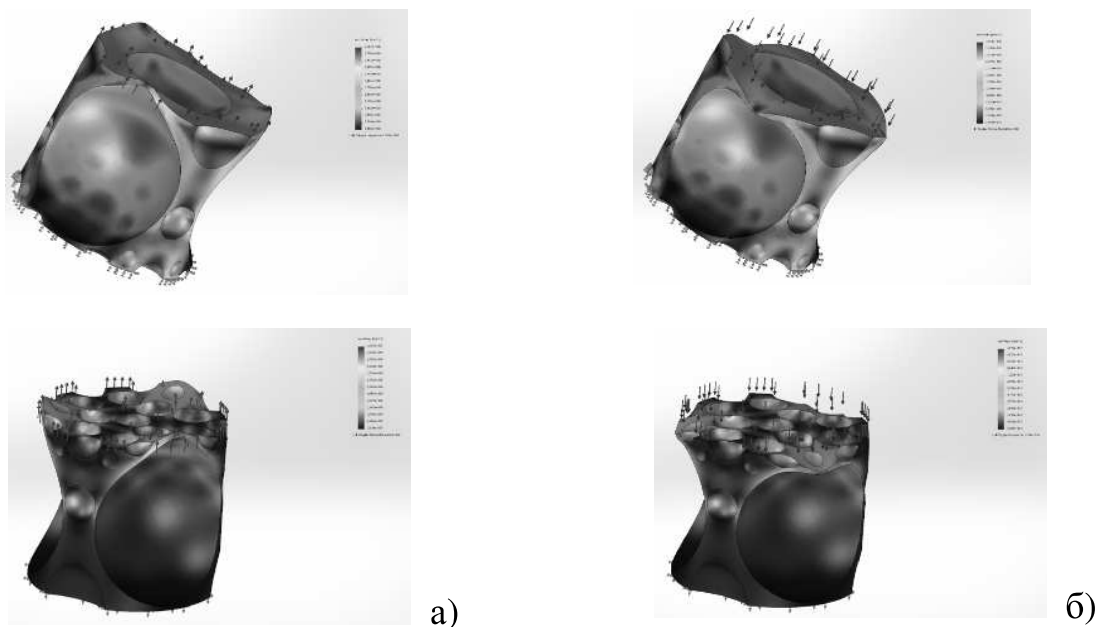


Рис. 4. Результат моделювання роботи елементарного об'єму масиву ніздрюватого бетону під навантаженням (зразок $(3В)*+В**+М***$):
а) – прикладені розтягуючі зусилля; б) – прикладені стискаючі зусилля

Результати досліджень. За результатами випробувань були побудовані графіки, які представлені на рис. 5. Графіки побудовані для елементарних об'ємів першої та другої групи за три-кульової схеми поєднання куль (див. табл. 1).

Напруження в елементарному об'ємі ніздрюватого бетону, як видно з графіків, залежить від виду поєднання куль, тобто воно залежить від розмірів комірок-бульбашок в тілі ніздрюватого бетону.

Детальний аналіз отриманих результатів показав, що в процесі завантаження таких елементарних об'ємів, які моделюють роботу масиву ніздрюватих бетонів, максимальні напруження виникають в місці мінімальної товщини стінки між порожнинами, що в реальності моделює

цементний камінь масиву бетону. Із збільшенням навантаження, напруження в цих місцях досягають критичних і оболонка комірки-бульбашки починає руйнуватись: утворюється тріщина, яка розростається в напрямі до наступної точки де стикуються комірки-бульбашки, тобто в масиві ніздрюватого бетону проходить процес тріщиноутворення.

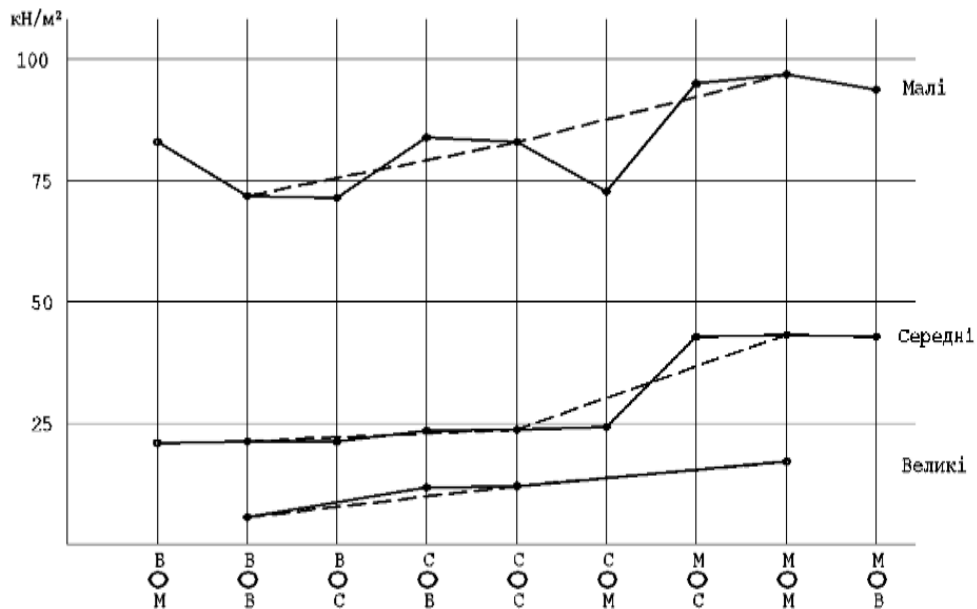


Рис. 5. Графіки залежності максимальних напружень в елементарному об'ємі від виду поєднання порожнистих куль (комірок-бульбашок):
 ————— — напруження при стиску; - - - - - — напруження при розтягу

Висновки. Результатами проведених теоретичних досліджень дозволяють припустити наступне:

- пропозиція використання порожнистих куль для моделювання структури ніздрюватих бетонів достатньо реалістично представляє масив ніздрюватих бетонів;
- використовуючи при моделюванні роботи масиву ніздрюватого бетону порожнисті кулі, можна точніше описати складні процеси, що проходять в масиві такого бетону під навантаженням;
- процес тріщиноутворення в масиві ніздрюватого бетону суттєво відрізняється від процесу тріщиноутворення в масиві важкого бетону і тому існуючі теорії руйнування не зовсім реалістично описують цей процес в ніздрюватих бетонах.

1. Ніздрюваті бетони: вчора, сьогодні, завтра [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://eco-ua.org/index.php?d_id=5&item=articles&sub=4830 - Назва з титулу, екрану.

Nizdriuvati betony: vchora, sohodni, zavtra [Elektronnyi resurs] - Rezhym dostupu: http://eco-ua.org/index.php?d_id=5&item=articles&sub=4830 - Nazva z tytul, ekranu.

2. Y.H. Mugahed Amran, Nima Farzadnia, A.A. Abang Ali. Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*. Volume 101, Part 1, 30 Desember 2015. P. 990-1005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>.

Y.H. Mugahed Amran, Nima Farzadnia, A.A. Abang Ali. Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*. Volume 101, Part 1, 30 Desember 2015. P. 990-1005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>.

3. Опекунів В. В. Пористі композиційні матеріали та їх використання у будівництві. Київ: Академія будівництва України, 2006, 85 с.

Opiekunov V. V. Porysti kompozytsiini materialy ta yikh vykorystannia u budivnytstvi. Kyiv: Akademiia budivnytstva Ukrainy, 2006. 85 s.

4. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

Cherepanov H.P. Mekhanyka khрупkoho razrusheniya / H.P. Cherepanov. – M.: Nauka, 1974. – 640 s.

5. Разрушение бетона и его долговечность [Гузеев Е.А., Леонович С.Н., Милованов А.Ф. и др.] ; за общ. ред. Е.А. Гузеева. – Минск : Тыздзень, 1997. – 170 с.

Razrusheniye betona y eho dolhovechnost [Huzeev E.A., Leonovych S.N., Mylovanov A.F. y dr.] ; za obshch. red. E.A. Huzeeva. – Mynsk : Tызden, 1997. – 170 s.

6. Карзов Г.П. Физико-математическое моделирование процессов разрушения / Г.П. Карзов, Б.З. Марголин, В.А. Швецова. – К. : 1993. – 391 с.

Karzov H.P. Fmzyko-matematycheskoe modelyrovanye protsessov razrusheniya / H.P. Karzov, B.Z. Marholyn, V.A. Shvetsova. – K. : 1993. – 391 s.

7. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1996. – 416 с.

Karpenko N.Y. Obshchye modely mekhanyky zhelezobetona / N.Y. Karpenko. – M. : Stroiyzdat, 1996. – 416 s.

8. Исследование ячеистых бетонов и конструкций: сборник науч. тр./гл. ред. Серых Р. Л.; ред. Муромский К. П. Москва: НИИЖБ, 1989. 111 с.

Yssledovanye yacheystykh betonov y konstruksii: sbornyk nauch. tr./hl. red. Serых R. L.; red. Muromskiy K. P. Moskva: NYYZhB, 1989. 111 s.

9. Пирадов К.А. Механика разрушения железобетона / К.А. Пирадов, Е.А. Гузеев. – М. : НИИЖБ, 1998. – 190 с.

Pyradov K.A. Mekhanyka razrusheniya zhelezobetona / K.A. Pyradov, E.A. Huzeev. – M. : NYYZhB, 1998. – 190 s.

10. Романенко В.М. Щодо визначення моменту утворення нормальних тріщин в згинальних залізобетонних елементах / В.М. Романенко // Будівельні конструкції. – Вип. 74. – К. : Будівельник, 2011. – С. 365 – 372.

Romanenko V.M. Shchodo vyznachennia momentu utvorennia normalnykh trishchyn v zghynalnykh zalizobetonnykh elementakh / V.M. Romanenko // Budivelni konstruksii. – Vyp. 74. – K. : Budivelnyk, 2011. – S. 365 – 372.